

Implementasi Sistem GeoAir Berbasis *Internet of Things* untuk Pemantauan Kualitas Udara dan Indeks Standar Pencemar Udara Secara *Real-Time*

1st Afta Herlambang
Teknik Telekomunikasi
Telkom, Indonesia

aftaherlambang@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Aloysius Adya Pramudita
Teknik Telekomunikasi
Telkom, Indonesia

pramuditaadya@telkomuniversity.ac.id

3rd Casmika Saputra
Teknik Telekomunikasi
Telkom, Indonesia

casmika@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Peningkatan jumlah kendaraan bermotor dan aktivitas perkotaan menyebabkan pencemaran udara yang semakin meningkat serta berdampak langsung terhadap kesehatan manusia. Sistem pemantauan kualitas udara konvensional umumnya bersifat *stasioner* sehingga memiliki keterbatasan dalam mobilitas, cakupan wilayah, dan representasi kondisi lingkungan. Penelitian ini mengembangkan GeoAir, yaitu sistem pengukuran kualitas udara portable berbasis *Internet of Things* yang mampu melakukan pemantauan secara *real-time* dan berbasis lokasi. Sistem GeoAir dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor SCD30 untuk karbon dioksida, MQ-7 untuk karbon monoksida, SPS30 untuk partikulat PM2.5 dan PM10, serta DHT22 untuk suhu dan kelembapan udara. Informasi lokasi diperoleh melalui modul GPS NEO-6M. Data pengukuran dikirimkan secara *real-time* ke *Firestore Realtime Database* dan divisualisasikan melalui aplikasi mobile GeoAir dalam bentuk nilai sensor, peta lokasi, histori data, dan kategori kualitas udara berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu mengukur parameter kualitas udara secara stabil pada kondisi lapangan. Analisis regresi linier menunjukkan korelasi yang cukup kuat antara data sensor dan data referensi, khususnya pada parameter CO₂, PM2.5, dan PM10. Selain itu, pengujian *usability* menggunakan metode *System Usability Scale* memperoleh skor 86,1 dengan kategori *excellent*. Berdasarkan hasil tersebut, GeoAir dinilai layak digunakan sebagai solusi pemantauan kualitas udara portable yang informatif, fleksibel, dan mudah digunakan.

Kata kunci — GeoAir, *Internet of Things*, Kualitas Udara, ISPU, Pemantauan Lingkungan

I. PENDAHULUAN

Permasalahan polusi udara saat ini semakin meningkat dan menjadi isu penting yang berdampak langsung terhadap kualitas hidup manusia serta kelestarian lingkungan. Aktivitas manusia, khususnya penggunaan kendaraan bermotor, aktivitas industri, dan pembakaran terbuka, merupakan sumber utama pencemaran udara di wilayah perkotaan. Paparan udara yang tercemar secara terus-menerus dapat menimbulkan berbagai gangguan kesehatan, mulai dari penyakit saluran pernapasan hingga penyakit kronis yang berpotensi mengancam jiwa, terutama pada kelompok masyarakat yang rentan.

Di Indonesia, laju pertumbuhan kendaraan bermotor yang sangat pesat menjadi salah satu faktor utama memburuknya kualitas udara. Data dari Gabungan Industri Kendaraan Bermotor Indonesia (GAIKINDO) menunjukkan bahwa jumlah kendaraan bermotor aktif pada awal tahun 2023 telah melampaui 153 juta unit, dengan mayoritas merupakan kendaraan pribadi, khususnya sepeda motor [1]. Tingginya volume kendaraan tersebut berbanding lurus dengan peningkatan emisi gas buang yang dilepaskan ke atmosfer, sehingga memperburuk kondisi udara di kawasan padat lalu lintas.

Kualitas udara yang menurun memberikan dampak luas, tidak hanya terhadap kesehatan masyarakat tetapi juga terhadap keseimbangan lingkungan dan aspek sosial ekonomi. Polusi udara telah menjadi salah satu permasalahan lingkungan yang krusial di Indonesia, terutama di wilayah perkotaan dengan tingkat kepadatan lalu lintas yang tinggi dan keterbatasan ruang terbuka hijau [2]. Emisi kendaraan bermotor merupakan kontributor dominan pencemaran udara, terutama pada kondisi lalu lintas yang padat dan tidak lancar, yang menyebabkan akumulasi polutan di udara ambien [3].

Dalam rangka mendukung upaya pengendalian dan pemantauan polusi udara, diperlukan sistem yang mampu melakukan pengukuran kualitas udara secara berkelanjutan dan *real-time*. Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pengembangan sistem pemantauan kualitas udara yang bersifat portabel dan terintegrasi. Sensor yang dipasang pada kendaraan atau perangkat bergerak dapat mengumpulkan data polutan di berbagai lokasi secara kontinu, kemudian dikirimkan ke platform pemantauan untuk dianalisis dan ditampilkan kepada pengguna [4]. Sistem ini diharapkan dapat menjadi sumber informasi yang andal bagi masyarakat dan pemangku kebijakan dalam mengambil langkah strategis guna mengurangi dampak polusi udara.

II. KAJIAN TEORI

Kajian teori yang mendasari pengembangan sistem GEO AIR meliputi konsep *Internet of Things* (IoT), penerapan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), sistem visualisasi dan *mobile application*, kalibrasi sensor, regresi linier dan koefisien determinasi, serta studi penelitian sebelumnya. Berikut merupakan penjelasan

dari kajian teori yang digunakan:

A. Internet of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang menghubungkan perangkat fisik seperti sensor, mikrokontroler, dan sistem komputasi kecil ke dalam jaringan internet sehingga memungkinkan pertukaran data secara otomatis tanpa interaksi manusia secara langsung [5]. Dalam sistem pemantauan kualitas udara, IoT berperan penting dalam proses akuisisi data sensor, pengiriman data ke server atau cloud, serta penyajian informasi secara *real-time* melalui aplikasi berbasis web maupun mobile [6]. Pemanfaatan IoT memungkinkan sistem pemantauan bersifat portable dan mobile sensing sehingga data yang diperoleh lebih merepresentasikan kondisi lingkungan sebenarnya [7].

B. Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU)

Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) merupakan sistem penilaian kualitas udara ambien yang digunakan secara nasional di Indonesia untuk menyampaikan tingkat pencemaran udara dalam bentuk indeks numerik yang mudah dipahami oleh masyarakat [8]. ISPU dihitung berdasarkan beberapa parameter polutan utama, antara lain PM₁₀, PM_{2.5}, CO, SO₂, NO₂, O₃, dan hidrokarbon (HC). Nilai konsentrasi polutan dikonversi menjadi nilai ISPU menggunakan metode interpolasi linier sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (1), sehingga perubahan konsentrasi polutan berbanding lurus dengan perubahan nilai indeks. Kategori ISPU digunakan sebagai dasar penyampaian informasi mutu udara serta peringatan dini terhadap dampak kesehatan. Kualitas udara berdasarkan ISPU diklasifikasikan menjadi beberapa kategori, yaitu Baik (1–50) yang aman bagi kesehatan, Sedang (51–100) yang masih dapat diterima, Tidak Sehat (101–200) yang berpotensi merugikan kesehatan, Sangat Tidak Sehat (201–300) yang meningkatkan risiko gangguan kesehatan, serta Berbahaya (>301) yang dapat menimbulkan dampak kesehatan serius dan memerlukan penanganan segera. Perhitungan nilai ISPU tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa parameter, yaitu nilai ISPU batas atas dan batas bawah, nilai konsentrasi ambien pada batas atas dan batas bawah, serta nilai konsentrasi ambien hasil pengukuran. Hubungan antarparameter tersebut kemudian dihitung menggunakan persamaan matematis ISPU sebagai berikut:

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \quad (1)$$

Dimana:

- I = ISPU terhitung
- I_a = ISPU batas atas
- I_b = ISPU batas bawah
- X_a = Konsentrasi ambien batas atas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- X_b = Konsentrasi ambien batas bawah ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- X_x = Konsentrasi ambien nyata hasil pengukuran ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

C. Sistem Visualisasi dan Mobile Application

Sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT dilengkapi dengan aplikasi mobile untuk menampilkan

data pengukuran secara *real-time*, seperti nilai ISPU, konsentrasi polutan, dan informasi lokasi berbasis GPS. Perancangan antarmuka aplikasi mengacu pada standar ISO 9241-110 untuk memastikan kemudahan penggunaan, konsistensi tampilan, serta penyajian informasi yang intuitif. Penerapan visualisasi berbasis indikator warna dan pembaruan data secara langsung bertujuan untuk memudahkan pengguna dalam memahami kondisi kualitas udara [9].

D. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor merupakan proses penyesuaian keluaran sensor terhadap nilai referensi yang telah terkalibrasi secara standar untuk meningkatkan akurasi dan keandalan pengukuran [10]. Kalibrasi sangat penting karena sensor berbiaya rendah rentan terhadap pengaruh lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan penuaan sensor. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan alat referensi, kemudian menerapkan model koreksi agar data sensor mendekati nilai sebenarnya.

E. Regresi Linier dan Koefisien Determinasi (R^2)

Analisis regresi linier digunakan untuk memodelkan hubungan antara data sensor dan data referensi dalam proses kalibrasi. Hubungan tersebut dinyatakan dalam bentuk persamaan linier yang sederhana dan mudah diimplementasikan pada sistem IoT [11]. Tingkat kesesuaian model regresi dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R^2), di mana nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa variasi data sensor dapat dijelaskan dengan baik oleh data referensi [12]. Nilai R^2 menjadi indikator utama dalam menilai konsistensi dan performa sensor pada sistem pemantauan kualitas udara.

F. Penelitian Terkait

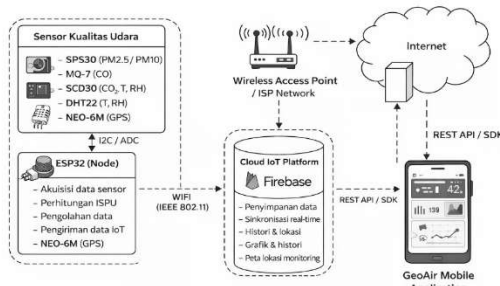
Stasiun Pemantauan Kualitas Udara (SPKU) merupakan sistem pemantauan resmi yang dikelola oleh KLHK dan Dinas Lingkungan Hidup dengan menggunakan perangkat stasioner berstandar nasional. SPKU merupakan sistem pemantauan kualitas udara resmi dengan akurasi tinggi yang menjadi acuan ISPU, namun bersifat statis, berjangkauan terbatas, dan membutuhkan biaya operasional besar sehingga kurang efektif untuk pemantauan dinamis [13]. Selain itu, Nafas Indonesia hadir sebagai inisiatif pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) dengan memanfaatkan sensor berbiaya rendah yang tersebar di beberapa kota besar, tetapi masih memiliki keterbatasan akurasi, konsistensi kalibrasi, serta cakupan wilayah [14]. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan udara portable berbasis IoT yang lebih fleksibel dan mobile.

III. METODE

A. Desain Sistem

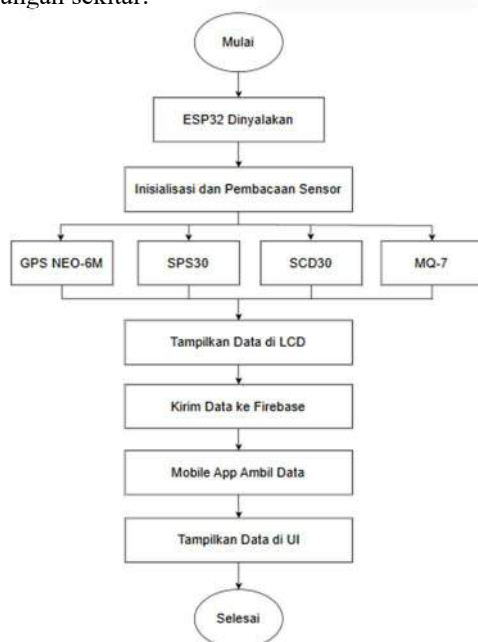
Pada bagian ini dijelaskan desain sistem yang digunakan dalam pengembangan Geo Air sebagai sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT). Desain sistem disusun untuk menggambarkan alur kerja dan keterkaitan antar komponen utama, mulai dari proses akuisisi data lingkungan, pengolahan data, hingga

penyajian informasi kepada pengguna. Perancangan ini bertujuan untuk memastikan sistem dapat bekerja secara terintegrasi, *real-time*, dan mudah diakses melalui aplikasi mobile.



GAMBAR 1
Sistem Arsitektur

Gambar 1 menunjukkan arsitektur sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang mengintegrasikan lingkungan fisik dengan aplikasi *mobile*. Sistem dimulai dari sensor yang menangkap parameter kualitas udara dan mengirimkannya ke mikrokontroler untuk diproses awal. Data kemudian dikirim melalui internet ke sistem *backend* untuk penyimpanan dan pengelolaan. Selanjutnya, informasi tersebut ditampilkan secara *real-time* pada aplikasi *mobile* sebagai antarmuka pengguna, sehingga pengguna dapat memantau kondisi kualitas udara secara mudah dan akurat, memberikan informasi yang akurat dan terkini mengenai kualitas udara di lingkungan sekitar.



GAMBAR 2
Flowchart Alur Kerja Sistem

Gambar 2 menunjukkan alur kerja sistem Geo Air mulai dari proses awal hingga data ditampilkan kepada pengguna. Proses dimulai ketika ESP32 dinyalakan dan melakukan inisialisasi seluruh sensor yang digunakan dalam sistem. Setelah itu, perangkat mulai melakukan pembacaan data dari sensor GPS NEO-6M, SPS30, SCD30, dan MQ-7 secara bersamaan. Data yang berhasil dibaca kemudian ditampilkan terlebih dahulu pada layar

LCD sebagai informasi langsung dari perangkat. Selanjutnya, ESP32 mengirimkan seluruh data tersebut ke layanan cloud Firebase untuk disimpan dan diakses secara *real-time*. Aplikasi mobile kemudian mengambil data dari Firebase dan menampilkannya dalam antarmuka pengguna (UI) yang telah dirancang agar mudah dipahami. Dengan demikian, seluruh proses pengukuran, pengiriman, hingga penyajian data dapat berjalan secara otomatis dan berurutan.

B. Implementasi

Bagian ini membahas tahapan implementasi sistem GEO AIR yang mencakup perancangan dan perakitan perangkat keras, hingga pengembangan aplikasi mobile sebagai media visualisasi data. Seluruh proses implementasi mengacu pada desain sistem yang telah ditetapkan sebelumnya, dengan tujuan memastikan sistem mampu bekerja secara optimal dalam memantau kualitas udara secara *real-time*.

i. Implementasi Hardware

Implementasi perangkat keras (*hardware*) pada sistem GeoAir yang dirancang untuk melakukan pemantauan kualitas udara secara *portable* dan *real-time*. Implementasi *hardware* dilakukan dengan mengintegrasikan beberapa sensor lingkungan, modul komunikasi, serta perangkat pendukung lainnya ke dalam satu sistem berbasis mikrokontroler. Seluruh komponen dirangkai pada papan PCB dan ditempatkan dalam casing pelindung untuk memastikan kestabilan sistem serta keandalan pengukuran saat digunakan di lapangan. Adapun komponen perangkat keras yang digunakan dalam sistem GeoAir dijelaskan sebagai berikut:

- ESP32: Mikrokontroler utama yang mengendalikan sistem dan seluruh sensor.
- GPS NEO-6M: Menyediakan koordinat lokasi pengukuran secara *real-time*.
- SPS30: Mengukur konsentrasi partikulat PM2.5 dan PM10.
- DHT22: Mengukur suhu dan kelembapan udara.
- MQ-7: Mendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida (CO).
- SCD30: Mengukur kadar CO₂ serta suhu dan kelembapan.
- LCD 16×2 I2C: Menampilkan data sensor dan status sistem.
- PCB: Media integrasi komponen agar rangkaian stabil.
- Casing: Melindungi perangkat saat digunakan di lapangan.

Gambar 4 menampilkan bagian dalam perangkat GeoAir yang berisi ESP32, sensor kualitas udara, dan rangkaian pendukung yang terpasang permanen pada PCB. Penggunaan PCB dan box pelindung bertujuan menjaga kestabilan sistem serta melindungi komponen dari gangguan lingkungan saat digunakan di lapangan. Serta

Gambar 5 menunjukkan tampilan luar perangkat GeoAir dengan *casing* tertutup dan layar LCD di bagian depan. LCD digunakan untuk menampilkan informasi kualitas udara *secara real-time*, sementara desain casing dibuat ringkas untuk mendukung penggunaan perangkat secara *portable*.

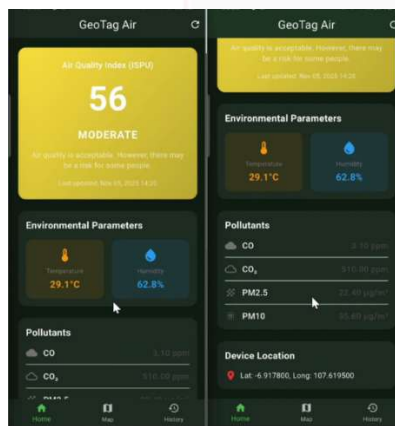


GAMBAR 4
Tampilan Bagian Dalam Alat



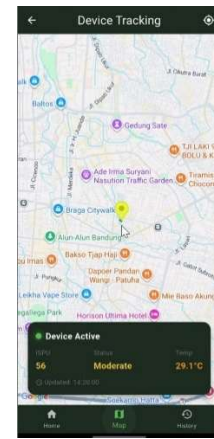
GAMBAR 5
Tampilan Hardware

ii. Implementasi *Mobile Application*

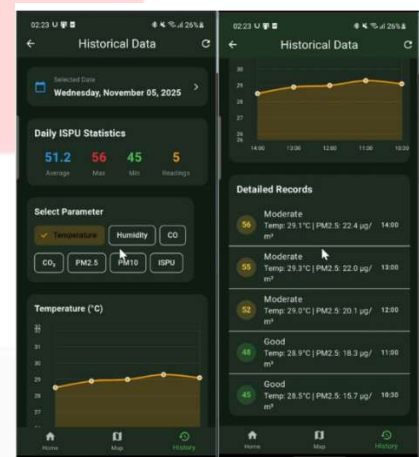


GAMBAR 6
Tampilan Home

Gambar 6 menampilkan halaman utama aplikasi yang menyajikan nilai ISPU beserta kategorinya, parameter lingkungan (suhu dan kelembapan), serta konsentrasi polutan CO, CO₂, PM2.5, dan PM10 secara *real-time*, lengkap dengan informasi koordinat lokasi perangkat.



GAMBAR 7
Tampilan Map



GAMBAR 8
Tampilan History

Sedangkan Gambar 7 menunjukkan fitur *Device Tracking* yang menampilkan posisi perangkat IoT pada peta digital disertai informasi status perangkat, nilai ISPU, kategori kualitas udara, dan suhu lingkungan. Gambar 8 memperlihatkan halaman *Historical Data* yang menyajikan statistik dan grafik tren harian ISPU serta parameter lingkungan, disertai daftar pembacaan sensor secara kronologis untuk analisis perubahan kualitas udara.

iii. Implementasi *Cloud*

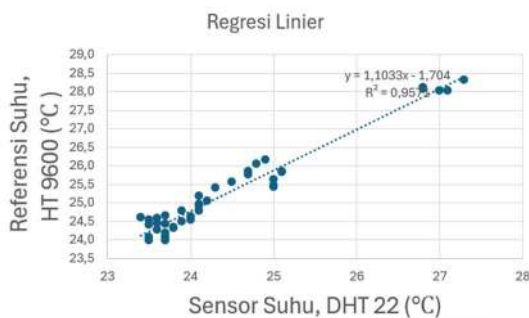
Implementasi *cloud* pada sistem GeoAir memanfaatkan Firebase sebagai *platform* utama untuk penyimpanan dan pengelolaan data secara *real-time*. Perangkat IoT berbasis ESP32 mengirimkan data hasil pengukuran sensor kualitas udara, seperti suhu, kelembapan, CO, CO₂, PM2.5, PM10, serta koordinat lokasi dari modul GPS ke Firebase melalui koneksi internet. Data tersebut disimpan pada Firebase Realtime Database sehingga dapat diperbarui dan diakses secara langsung oleh aplikasi *mobile* tanpa memerlukan proses penyegaran manual. Pada sisi aplikasi, Firebase berperan sebagai penghubung antara perangkat lapangan dan pengguna. Aplikasi *mobile* mengambil data dari cloud dan

menampilkannya dalam bentuk visualisasi yang informatif. Selain itu, Firebase Authentication digunakan untuk mengatur proses *login* dan hak akses pengguna, sehingga keamanan data tetap terjaga. Integrasi *cloud* ini mendukung pemantauan kualitas udara yang efisien, responsif, dan dapat diakses kapan saja sesuai dengan kebutuhan pengguna.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

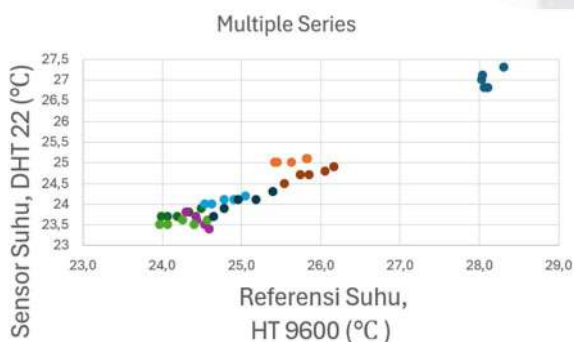
Pengujian dilaksanakan di sekitar Telkom University dengan titik pengukuran meliputi Masjid PBB, Gerbang PBB, Podomoro, Cikoneng, Sukabirus, Bundaran Telkom, SPBU Bojongsoang, dan Indomaret Bojongsoang. Pada setiap lokasi, data diambil sebanyak lima kali dengan interval sekitar satu menit untuk mengevaluasi akurasi jadi terdapat 40 data untuk tiap parameter, konsistensi pembacaan sensor, serta kestabilan sistem dalam kondisi penggunaan lapangan yang dinamis.

A. Pengujian Suhu



GAMBAR 9
Grafik Regresi Linear Suhu

Grafik regresi linier pada Gambar 9 menunjukkan hubungan antara nilai suhu hasil pengukuran sensor DHT22 dengan suhu referensi melalui persamaan $y = 1,1033x - 1,704$ dan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,9571$. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan adanya korelasi yang sangat kuat, sehingga sensor DHT22 memiliki karakteristik pengukuran yang linear dan konsisten. Persamaan regresi ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar koreksi data untuk meningkatkan akurasi pengukuran suhu.

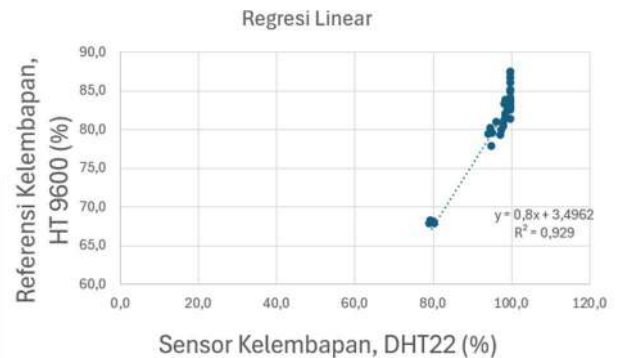


GAMBAR 10
Grafik Multiple Series Suhu

Grafik multiple series pada Gambar 10 menampilkan

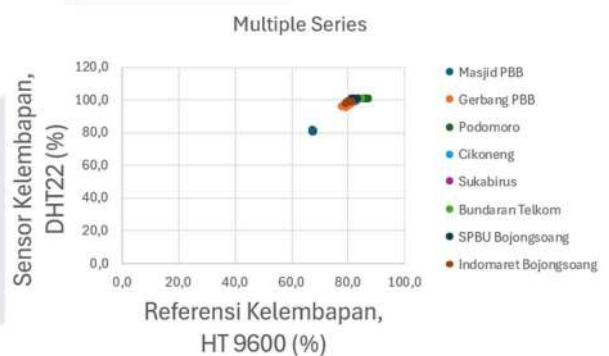
sebaran hasil pengukuran suhu di beberapa lokasi pengujian yang ditunjukkan dengan warna berbeda. Pola data pada masing-masing lokasi terlihat relatif berdekatan dan tidak menyebar secara ekstrem, yang menandakan kestabilan pembacaan sensor DHT22 pada berbagai kondisi lingkungan. Hasil ini memperkuat bahwa sensor mampu memberikan pengukuran suhu yang stabil dan dapat diandalkan.

B. Pengujian Kelembapan



GAMBAR 11
Grafik Regresi Linear Kelembapan

Grafik regresi linier pengujian kelembapan pada Gambar 11 menghasilkan persamaan $y = 0,1041x + 70,956$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0,1012$. Nilai R^2 yang rendah menunjukkan bahwa korelasi antara hasil pengukuran sensor DHT22 dan data referensi relatif lemah, meskipun memiliki kecenderungan linier positif. Kondisi ini dipengaruhi oleh sensitivitas sensor terhadap perubahan lingkungan serta fluktuasi kelembapan yang cepat saat pengujian di lapangan, termasuk adanya satu titik data yang menyimpang akibat gangguan lingkungan atau posisi sensor.



GAMBAR 12
Grafik Multiple Series Kelembapan

Grafik multiple series pada Gambar 12 menunjukkan sebaran data kelembapan di berbagai lokasi pengujian yang umumnya berada pada rentang nilai yang berdekatan, menandakan konsistensi pembacaan sensor DHT22. Lokasi dengan kondisi lingkungan stabil menghasilkan data yang lebih rapat, sedangkan area yang dinamis menunjukkan variasi lebih besar. Secara keseluruhan, meskipun korelasi liniernya tidak kuat, proses kalibrasi dan koreksi tetap meningkatkan

kesesuaian data, sehingga sensor DHT22 masih layak digunakan untuk pemantauan kelembapan pada sistem IoT GeoAir.

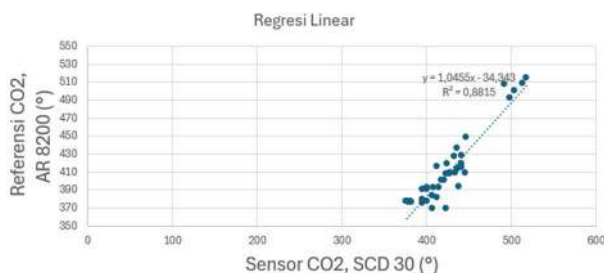
C. Pengujian CO

TABEL 1
Hasil Pengujian Sensor MQ-7

Tanggal	Jam	Lokasi	Data CO	ISPU
02/01/2026	15.43	Masjid PBB	7,16 ppm	Baik
02/01/2026	16.39	Gerbang PBB	9,47 ppm	Baik
02/01/2026	17.39	Podomoro	10 ppm	Baik
02/01/2026	17.46	Cikoneng	9,23 ppm	Baik
02/01/2026	17.55	Sukabirus	7,9 ppm	Baik
02/01/2026	18.06	Bundaran Telkom	8,83 ppm	Baik
02/01/2026	18.13	SPBU Bojongsoang	9,64 ppm	Baik
02/01/2026	18.19	Indomaret Bojongsoang	10 ppm	Baik

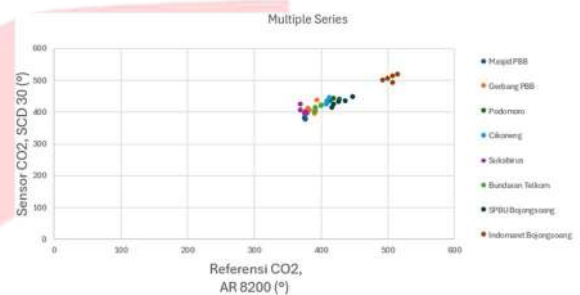
Berdasarkan hasil pengukuran konsentrasi gas karbon monoksida (CO) yang dilakukan pada 02 Januari 2026, diperoleh 40 data pengukuran di delapan lokasi, yaitu Masjid PBB, Gerbang PBB, Podomoro, Cikoneng, Sukabirus, Bundaran Telkom, SPBU Bojongsoang, dan Indomaret Bojongsoang, dengan interval sekitar satu menit. Nilai CO berada pada rentang 6,69–10 ppm, di mana lokasi dengan aktivitas lalu lintas rendah seperti Masjid PBB menunjukkan nilai yang lebih stabil, sedangkan lokasi dengan aktivitas kendaraan tinggi seperti Podomoro, SPBU Bojongsoang, dan Indomaret Bojongsoang mencatat nilai tertinggi mendekati 10 ppm. Meskipun terjadi variasi antar lokasi, hasil perhitungan ISPU berdasarkan Persamaan (2.1) menunjukkan seluruh data termasuk kategori “Baik”, sehingga kualitas udara berdasarkan parameter CO masih aman bagi kesehatan. Hasil ini menegaskan bahwa sistem pemantauan polusi udara portable berbasis IoT yang dikembangkan mampu mengukur konsentrasi CO secara konsisten serta mengklasifikasikan kualitas udara secara akurat sesuai kondisi lingkungan.

D. Pengujian CO₂



GAMBAR 13
Grafik Linear CO₂

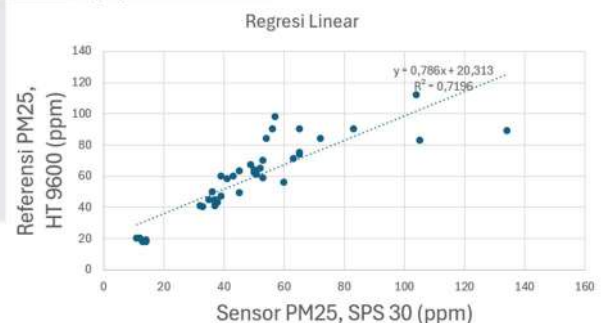
Grafik regresi linier pada Gambar 13 menunjukkan hubungan kuat antara data sensor SCD30 dan data referensi CO₂ dengan persamaan $y = 1,0455x - 34,343$ dan nilai $R^2 = 0,8815$. Hasil ini menunjukkan bahwa sensor mampu mengikuti perubahan konsentrasi CO₂ secara konsisten dan proporsional, meskipun terdapat sedikit deviasi akibat faktor lingkungan dan fluktuasi konsentrasi, sehingga diperlukan koreksi data untuk meningkatkan akurasi. Sebaran data yang berada pada rentang 370–500 ppm mencerminkan variasi kondisi lingkungan dari area terbuka hingga lokasi dengan aktivitas tinggi. Secara keseluruhan, sensor SCD30 dinilai memiliki performa yang stabil dan layak digunakan dalam sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT.



GAMBAR 14
Grafik Multiple Series CO₂

Grafik multiple series pada Gambar 14 menunjukkan distribusi data CO₂ yang konsisten di setiap lokasi pengujian, dengan nilai lebih rendah pada area bersirkulasi udara baik seperti Masjid PBB dan Gerbang PBB, serta nilai lebih tinggi pada lokasi dengan aktivitas kendaraan dan manusia yang padat seperti SPBU dan Indomaret Bojongsoang. Pola ini menegaskan bahwa sensor SCD30 mampu merepresentasikan perbedaan konsentrasi CO₂ antar lokasi secara jelas, sehingga dinilai akurat dan layak digunakan untuk pemantauan kualitas udara *real-time* berbasis IoT.

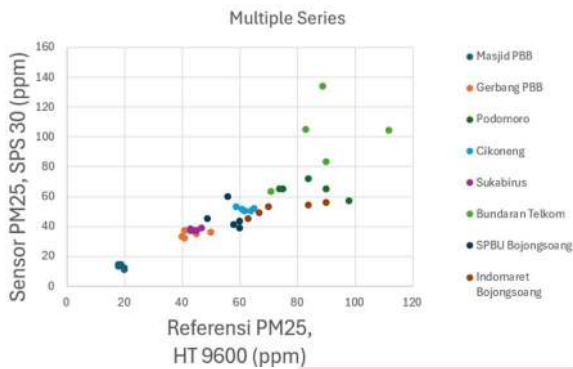
E. Pengujian PM 2.5



GAMBAR 15
Grafik Linear PM 2.5

Grafik regresi linier PM2.5 pada Gambar 15 menunjukkan hubungan antara pembacaan sensor SPS30 dan data referensi dengan persamaan $y = 0,786x + 20,313$ serta nilai $R^2 = 0,7196$, yang menandakan korelasi cukup kuat. Kemiringan garis regresi yang lebih kecil dari satu menunjukkan kecenderungan sensor membaca lebih rendah pada konsentrasi PM2.5 tinggi. Sebaran data yang

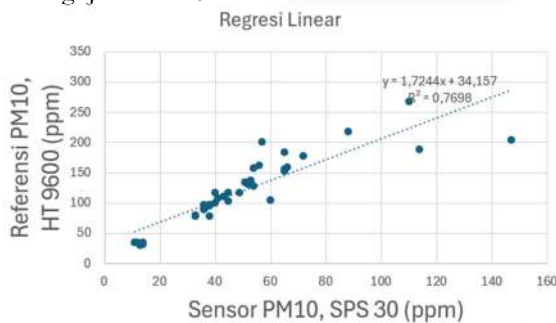
relatif lebar mengindikasikan adanya ketidakpastian pengukuran akibat fluktuasi partikel dan dinamika udara, namun tren data tetap mengikuti garis regresi, sehingga sensor SPS30 masih mampu merepresentasikan perubahan konsentrasi PM2.5 secara umum.



GAMBAR 16
Grafik Multiple Series PM 2.5

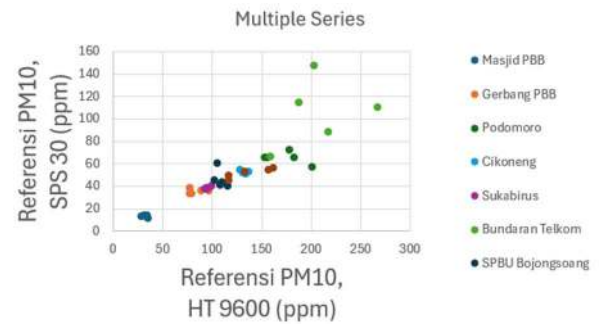
Grafik multiple series pada Gambar 5.9 menunjukkan variasi konsentrasi PM2.5 di setiap lokasi pengujian, di mana nilai terendah umumnya ditemukan di Masjid PBB, sedangkan nilai tertinggi berada di Podomoro dan Bundaran Telkom yang memiliki aktivitas lalu lintas lebih padat. Lokasi SPBU dan Indomaret Bojongsong juga memperlihatkan konsentrasi PM2.5 yang relatif lebih tinggi akibat pengaruh emisi kendaraan. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa sensor SPS30 mampu membedakan pola dan variasi PM2.5 antar lokasi dengan baik, sehingga layak digunakan untuk pemantauan tren PM2.5 secara *real-time* pada sistem IoT *portable*.

F. Pengujian PM 10



GAMBAR 17
Grafik Regresi Linear PM 10

Grafik regresi linier PM10 pada Gambar 17 menghasilkan persamaan $y = 1,7246x + 34,157$ dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,7698. Nilai tersebut menunjukkan adanya hubungan linier positif yang cukup kuat, di mana peningkatan variabel X diikuti oleh kenaikan konsentrasi PM10. Besarnya nilai R^2 mengindikasikan bahwa model regresi mampu menjelaskan sebagian besar variasi data PM10, sementara sisanya dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti kondisi cuaca, aktivitas lalu lintas, dan lingkungan sekitar, sehingga model ini dinilai cukup representatif dalam menggambarkan tren PM10.



GAMBAR 18
Grafik Multiple Series PM 10

Grafik sebaran PM10 pada Gambar 18 memperlihatkan perbedaan konsentrasi yang jelas antar lokasi pengujian. Area dengan aktivitas lalu lintas dan komersial tinggi, seperti Podomoro serta sekitar SPBU dan Indomaret Bojongsong, menunjukkan konsentrasi PM10 yang lebih tinggi dan bervariasi, sedangkan lokasi dengan aktivitas kendaraan lebih rendah cenderung memiliki nilai yang lebih stabil. Hal ini menegaskan bahwa karakteristik lokasi dan sumber emisi lokal, khususnya kendaraan bermotor, sangat berpengaruh terhadap tingkat pencemaran PM10 di udara ambien.

G. Functional Testing

Pengujian fungsional aplikasi GeoAir dilakukan untuk memastikan seluruh fitur utama berjalan sesuai dengan perancangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aplikasi dapat dibuka tanpa kendala, ditandai dengan munculnya splash screen dan halaman utama (*Home*) secara normal. Pada halaman *Home*, informasi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) beserta kategorinya berhasil ditampilkan sesuai data, disertai parameter lingkungan seperti suhu dan kelembapan, serta data polutan meliputi CO, CO₂, PM2.5, dan PM10 yang tampil lengkap berdasarkan pembacaan sensor. Fitur pemetaan juga berfungsi dengan baik, di mana lokasi perangkat dapat ditampilkan pada peta sesuai koordinat GPS, disertai status perangkat yang aktif. Selain itu, menu riwayat data mampu menampilkan grafik dan daftar data historis, serta mendukung pemilihan parameter tertentu yang secara otomatis menyesuaikan tampilan grafik. Aplikasi juga berhasil menampilkan indikator peringatan ketika kualitas udara berada pada kondisi tertentu. Secara keseluruhan, seluruh skenario pengujian berhasil dijalankan dengan baik, menandakan bahwa aplikasi GeoAir berfungsi secara stabil dan sesuai dengan kebutuhan sistem pemantauan kualitas udara.

Berdasarkan hasil functional testing, seluruh fitur utama aplikasi mobile GeoAir berjalan dengan baik dan sesuai kebutuhan pengguna. Aplikasi mampu menampilkan data sensor kualitas udara secara akurat, menunjukkan lokasi perangkat berbasis GPS, serta menyajikan nilai ISPU/AQI beserta indikator peringatan tanpa kendala. Seluruh skenario pengujian berhasil dijalankan, dengan antarmuka yang responsif dan mudah digunakan, sehingga dapat disimpulkan bahwa aplikasi GeoAir telah memenuhi aspek fungsionalitas, keandalan, dan kemudahan penggunaan sesuai dengan perancangan.

sistem.

H. Usability Testing

TABEL 8
Pengujian SUS

No	Responden	Q1	...	Q10	SUS
1	Reponden 1	4	...	1	80,0
...	...	...	...	...	...
20	Responden 29	5		2	87,5
Rata-rata					86,1

SUS Score	Grade	Adjective Rating
> 80.3	A	Excellent
68 – 80.3	B	Good
68	C	Okay
51 – 68	D	Poor
< 51	F	Awful

GAMBAR 19
Interpretasi SUS Skor

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditampilkan pada Tabel 5.9, diperoleh skor rata-rata SUS sebesar 86,1. Mengacu pada standar interpretasi skor SUS, nilai tersebut termasuk dalam kategori “*Excellent*” (Sangat Baik), yaitu berada pada rentang skor di atas 80,3. Hasil ini menunjukkan bahwa aplikasi GeoAir memiliki tingkat kegunaan yang sangat tinggi dan dapat diterima dengan baik oleh pengguna.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem GeoAir berhasil dikembangkan sebagai sistem pengukuran kualitas udara portable berbasis Internet of Things (IoT). Sistem ini mampu mengukur parameter CO, CO₂, PM2.5, PM10, suhu, dan kelembapan secara *real-time* dengan tingkat akurasi yang baik serta mampu menampilkan informasi kualitas udara berbasis lokasi melalui integrasi modul GPS.

Hasil analisis regresi linier menunjukkan adanya korelasi yang cukup kuat antara data sensor dan data referensi, yang menandakan bahwa sensor yang digunakan mampu merepresentasikan kondisi kualitas udara lingkungan dengan baik setelah dilakukan proses koreksi data. Seluruh data pengukuran berhasil dikonversi ke dalam kategori kualitas udara berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), sehingga informasi yang disajikan bersifat standar dan mudah dipahami oleh pengguna.

Selain itu, aplikasi mobile GeoAir terbukti memiliki tingkat kemudahan penggunaan yang tinggi berdasarkan

hasil pengujian usability dengan metode SUS yang memperoleh skor 86,1 (Excellent). Secara keseluruhan, sistem GeoAir dinilai berfungsi dengan baik, memenuhi tujuan penelitian, dan layak digunakan sebagai solusi pemantauan kualitas udara portable yang fleksibel, informatif, dan dapat mendukung pemantauan lingkungan secara berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] GAIKINDO, “Jumlah Kendaraan di Indonesia 147 Juta Unit, 60 Persen di Pulau Jawa,” <https://www.gaikindo.or.id/jumlah-kendaraan-di-indonesia-147-juta-unit-60-persen-di-pulau-jawa/>.
- [2] E. R. N. Wulandari, N. Rosyida, B. Sutawijaya, H. M. Abdullah, and S. R. Asriningtias, “PERANCANGAN SENSOR GAS BERBASIS IoT UNTUK PEMANTAUAN KUALITAS UDARA,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3S1, Oct. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3s1.4977.
- [3] D. S. Al Fathin, “Sistem Pemantauan Polusi Udara Berbasis Internet of Things dengan Algoritma Long Short-Term Memory,” <https://repository.upi.edu/123251/>.
- [4] T. V. Damayanti and R. E. Handriyono, “Monitoring Kualitas Udara Ambien Melalui Stasiun Pemantau Kualitas Udara Wonorejo, Kebonsari Dan Tandes Kota Surabaya,” *Environ. Eng. J. ITATS*, vol. 2, no. 1, pp. 11–18, Mar. 2022, doi: 10.31284/j.envitats.2022.v2i1.2897.
- [5] B. Biancha, “Internet of Things (IoT) for Environmental Monitoring,” *Int. J. Comput. Eng.*, 2024.
- [6] J. Waworundeng, “IoT-based Environmental Monitoring with Data Analysis of Temperature, Humidity, and Air Quality,” *CogITO Smart J.*, vol. 10, no. 1, pp. 271–284, 2024, doi: 10.31154/cogito.v10i1.708.692-705.
- [7] T. Blinova, S. S. Chauhan, T. Singla, S. Bansal, A. Mittal, and V. S. Yellanki, “Performance Evaluation of IoT Sensors in Urban Air Quality Monitoring: Insights from the IoT Sensor Performance Test,” *BIO Web Conf.*, vol. 86, 2024, doi: 10.1051/bioconf/20248601088.
- [8] MENTERI LINGKUNGAN HIDUP DAN KEHUTANAN REPUBLIK INDONESIA, “Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan nomor 14 tahun 2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara,” <https://ditppu.menlhk.go.id/portal/read/indeks-standar-pencemar-udara-ispu-sebagai-informasi-mutu-udara-ambien-di-indonesia>.
- [9] International Organization for Standardization, “ISO 9241-110:2019 Ergonomics of Human-

- System Interaction — Part 110: Interaction Principles,” Geneva, 2019. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/77520.html>
- [10] F. Karagulian *et al.*, “Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 10, no. 9, 2019, doi: 10.3390/atmos10090506.
- [11] and K. Du Minxing Si, Ying Xiong, Shan Du, “Evaluation and calibration of a low-cost particle sensor in ambient conditions using machine-learning methods,” vol. 13, no. 4, 2020, [Online]. Available: <https://amt.copernicus.org/articles/13/1693/2020/>
- [12] J. K. Bean, “Evaluation methods for low-cost particulate matter sensors,” vol. 14, no. 11, 2020, [Online]. Available: <https://amt.copernicus.org/articles/14/7369/2021/>
- [13] D. L. HIDUP, “DINAS LINGKUNGAN HIDUP.”
- [14] NAFAS, “Kini Anda Bisa Menjadi Bagian dari Ekosistem Kualitas Udara Luar Ruangan Terbesar di Indonesia!” [Online]. Available: <https://nafas.co.id/blog/Kini-Anda-Bisa-Menjadi-Bagian-dari-Ekosistem-Kualitas-Udara-Luar-Ruangan-Terbesar-di-Indonesia>

